

補助事業番号 2018M-174  
補助事業名 平成30年度 下駄状多孔体と気泡微細化沸騰による超薄型流路冷却技術の革新 補助事業  
補助事業者名 九州大学 森 昌司

## 1 研究の概要

超薄型流路伝熱面の冷却限界を大幅に向上させる新しい高効率沸騰機構を提案し、実証する。本手法の要点は以下の通りである。従来困難だった超薄型大伝熱面冷却デバイスの冷却限界を下駄状多孔体により向上させ、冷却性能が非常に高いにも関わらず圧力損失が低く、ナノ・マクロ孔を制御した超高性能新型多孔体を開発する点である。

## 2 研究の目的と背景

薄型流路伝熱面の冷却限界を大幅に向上させる新しい高効率流動沸騰機構を提案・実証する。

### 【超高熱流束除熱の重要性】

地球温暖化、エネルギー問題からガソリン車から電気自動車、燃料電池車への転換は必須である。その中で次世代型車載用インバーターでは、パワーデバイスの高集積化が進み、その大きな発熱処理がボトルネックで薄型流路かつ大伝熱面積で、超高熱流束除熱可能な冷却手法が切望されている。一般に、沸騰冷却の限界は、Critical Heat Flux (以下 CHF) と呼ばれ、これを超えて熱負荷を増やすと熱機器は破損する。従来性能を凌駕するには、ミクロからマクロスケールにわたる気液の流れを最適化することが不可欠で、そのために新しい制御手法の確立が要求されている。

### 【新型下駄状多孔体を用いた薄型流路内沸騰 CHF の飛躍的な向上】

一般に、薄型流路において高熱流束除熱は現状では困難である。なぜなら図 1 で示すように、流路内断面内の端部を水が流れ、伝熱面中央でドライアウトが容易に発生するからである。そこで、本課題では超薄型流路で従来性能に比して大幅な CHF 向上を可能とするため、下駄状多孔体 (図 2) による冷却法を提案する。下駄状多孔体による CHF 向上効果は以下の通りである。

- (1) 強烈な毛管力による発熱面への水供給と蒸気排出溝による気液循環の促進。
  - (2) 複数流路への細分化による端部の水のかたより解消。
  - (3) 流路上面の水 (図 1) を多孔体により吸水し、無駄なく伝熱面へ効率的に供給。
  - (4) 大幅な圧力損失の低減 (多孔体を流路断面全面に挿入する一般的な手法と比較して)。
- 上記に効果により飛躍的な CHF 向上を目指す。

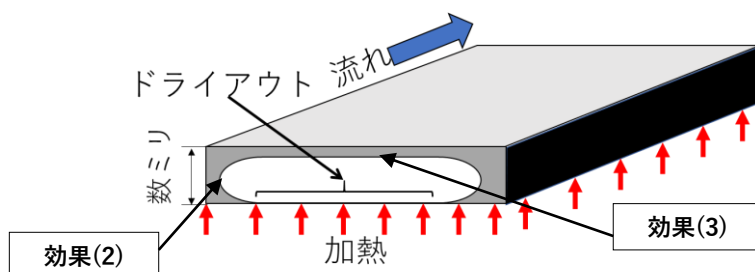


図 1 薄型矩形流路内の気液分布

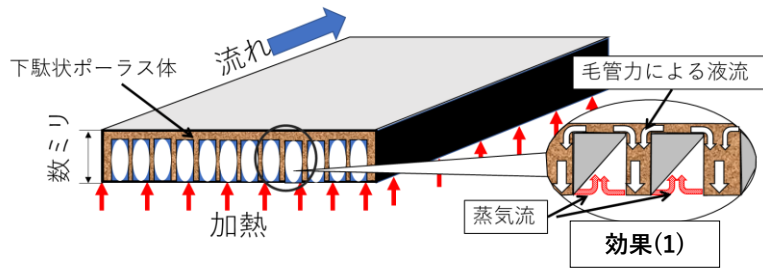


図2 下駄状多孔体による超薄型流路の新規沸騰冷却法

### 3 研究内容

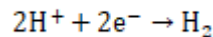
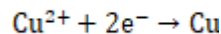
(1) 幾何形状・細孔構造が制御された新型下駄状多孔体の開発

(<http://therme.mech.kyushu-u.ac.jp/jpn/research.html>)

(1)-1 多孔質体の製作装置

多孔質体の製作装置を図3に示す。純度99.5 [%] の硫酸銅3.99 [g] と純度98 [%] の硫酸20 [mL] を蒸留水に溶解させ、 $\text{CuSO}_4$  0.4 [mol/L] ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1.5 [mol/L] のめっき浴40 [mL] を調製した。使用した電極板は厚さ0.3 [mm] の純度99.96 [%] の銅板である。電極間距離は2 [cm] とした。

この硫酸銅めっき浴に電流を流すと、カソードでは以下の反応が同時に起こる。



銅の析出反応と水素発生が同時に起こり、水素ガスによって銅の析出反応が部分的に妨げられ、銅の多孔質構造がカソード表面に形成される。

まず、直流電源装置(日本スタビライザー工業製 最大電圧18 [V] 最大電流100 [A] )を用いて、3 [A] または6 [A] の電流を120秒間または240秒間流した。次に多孔質体の強度を高めるために、0.1 [A] の低電流を1時間流した。最後に真空炉(フルテック製 最高温度1200 [°C] 炉内サイズφ43 [mm] ×60 [mm] )で940 [°C] で30分間焼結させた。

また、多孔質層を銅板に部分的に形成させないために、形成させない場所にカプトンテープを貼った。作製した多孔質体は、SEMを用いて表面を観察した。

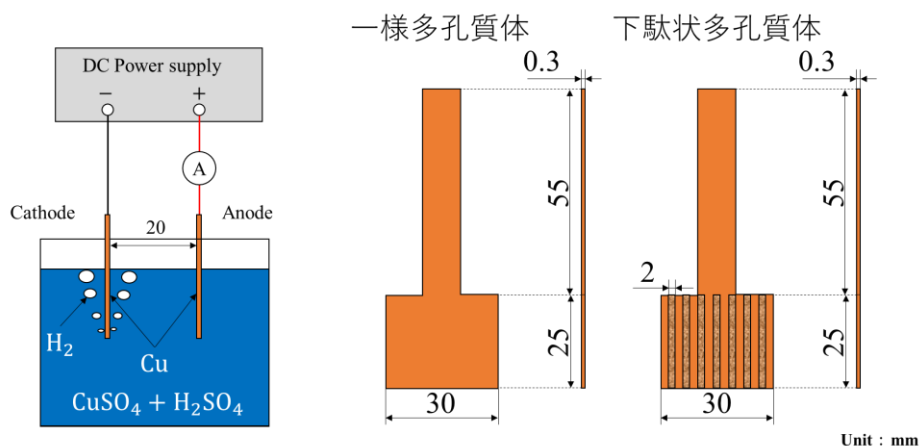


図3 多孔質体の製作装置

(1)–2 多孔質体の性状の評価

多孔質体の性状の評価を吸水性の観点から行った。吸水性の測定実験図を図4に示す。実験手順としては、マイクロシリンジを固定し、その先端に5 [μL] の水滴を作り、ラボジャッキに多孔質体を設置し、少しずつラボジャッキを高くしていった。そして、水滴が多孔質体に接触してから多孔質体に完全に吸収されるまでの時間をハイスピードカメラ(キーエンス製 VW-600M×VH-Z20W、VW-L1)で測定した。

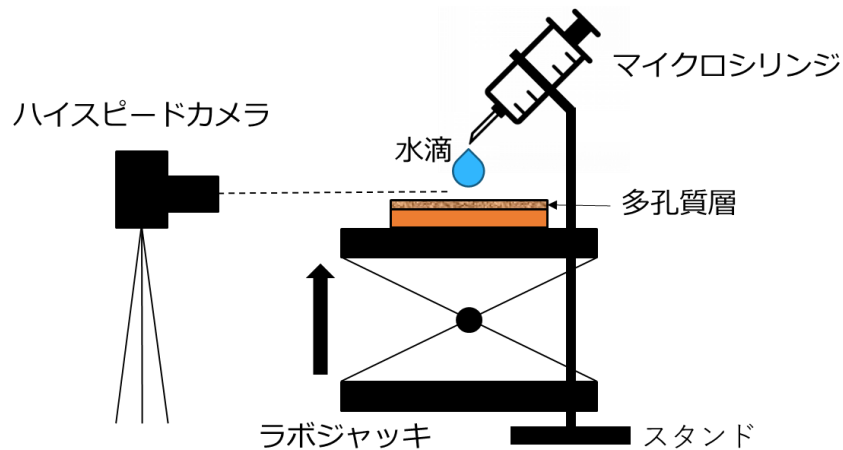


図4 吸水性の測定実験図

(1)–3 多孔質体の作製条件

今回作製した多孔質体の作製条件を Table 1 に示す。

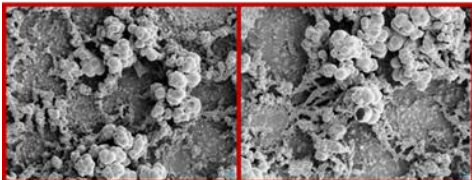
Table 1 多孔質体の作製条件

溶液濃度 [mol/L]	電流値 [A]	電流密度 [A/cm <sup>2</sup> ]	電気分解時間 [s]	低電流
0.8	3	0.4	120	無
			240	有
	6	0.8	120	無
			240	有

(1)-4 電流の大きさによる性状の違い

SEM画像を図5に示す。SEM画像から、高電流で作製した多孔質体の方がその表面が、多孔質層でより覆われている様子が見受けられた。この結果より、電流の大きさは多孔質体の性状に大きな影響を与えることが分かった。

S0.8・A3・E240の多孔質体



S0.8・A6・E240の多孔質体

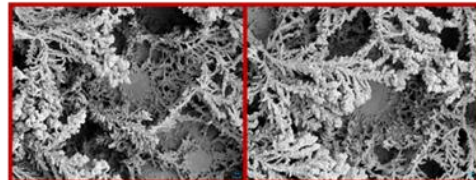
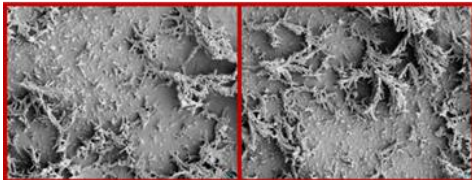


図5 SEM画像

(1)-5 電気分解時間による性状の違い

SEM画像を図6に示す。SEM画像から、長時間の電気分解で作製した多孔質体の方が、その表面が多孔質層でより覆われている様子が見受けられた。この結果より、電気分解時間は多孔質体の性状に大きな影響を与えることが分かった。

S0.8・A3・E120の多孔質体



S0.8・A6・E240の多孔質体

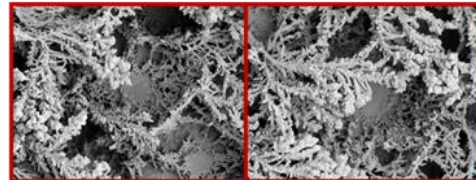
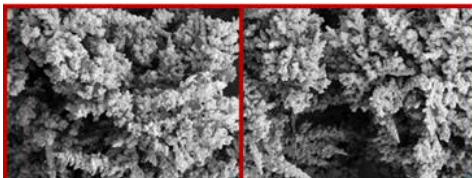


図6 SEM画像

(1)-6 一時間の低電流の有無による性状の違い

SEM画像を図7に示す。SEM画像から、一時間の低電流を加えて作製した多孔質体の方がその表面が多孔質層でより覆われている様子が見受けられた。この結果より、一時間の低電流の有無は多孔質体の性状に大きな影響を与えることが分かった。

S0.8・A6・E240・LCの多孔質体



S0.8・A6・E240の多孔質体

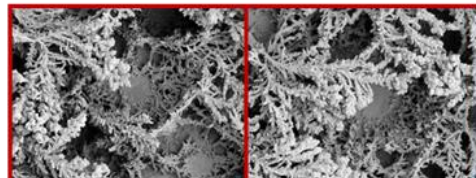


図7 SEM画像

(1)-7 吸水力の測定結果

吸水力の測定結果をTable 2に示す。この結果より、S0.8・A6・E240・LCの多孔質体が最も吸水時間が短いことが分かった。そこで、本実験では、図8に示すS0.8・A6・E240・LCの一樣多孔質体Bと下駄状多孔質体Bを使用した。また、吸水力とCHFの関係を把握するために、S0.8・A6・E120・LCの一樣多孔質体Aも使用した。

Table 2 吸水力の測定結果(「∞」は吸水しなかったことを意味する。)

溶液濃度 [mol/L]	電流値 [A]	電流密度 [A/cm <sup>2</sup> ]	電気分解時間 [s]	低電流	多孔質体の厚さ [mm]	吸水時間 [s]	
0.8	3	0.4	120	無	0.200 ± 0.132	∞	
				有	0.150	∞	
			240	無	0.067 ± 0.029	0.112	
				有	0.483 ± 0.144	∞	
	6	0.8	120	無	0.083 ± 0.029	∞	
				有	0.500 ± 0.200	0.152	多孔体A
240	無	0.383 ± 0.029	0.208				
	有	0.833 ± 0.029	0.016	多孔体B			

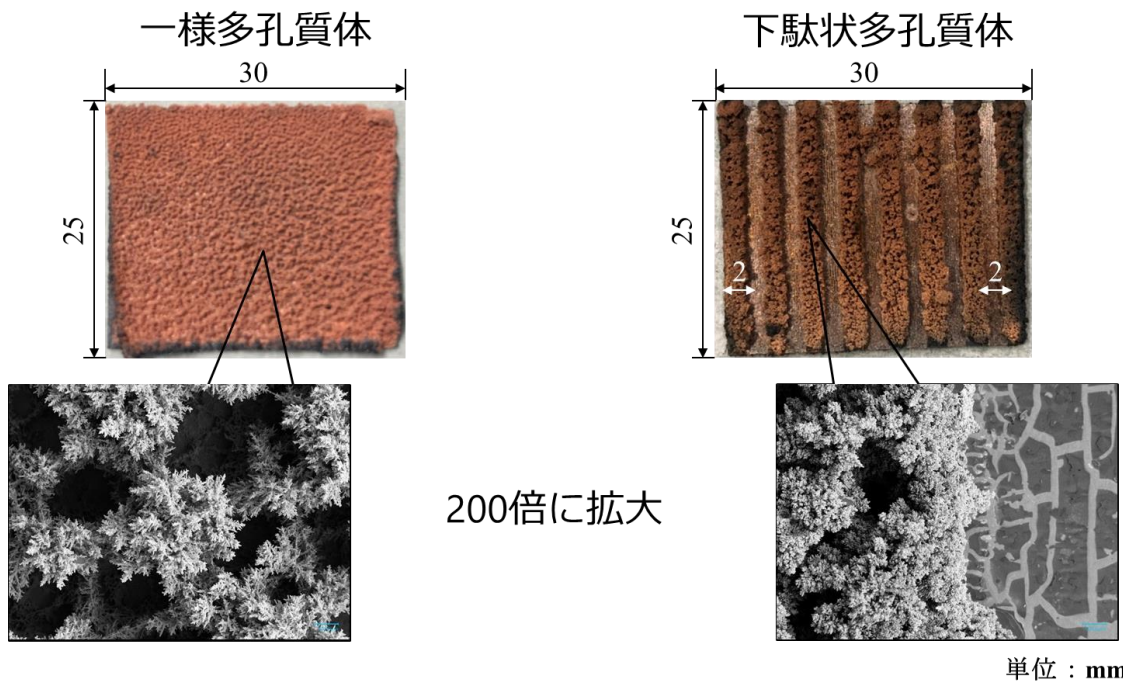


図8 SEM画像

(2) 下駄状多孔体による狭隘流路の流動沸騰CHFの向上

(<http://therme.mech.kyushu-u.ac.jp/jpn/research.html>)

(2)-1 実験方法

ポンプを稼働させ、定流量弁を用いて、流量を一定にした後に恒温水槽を稼働させ、テストセクションの入口温度が一定になるように調節した。その後、カートリッジヒーターに電力を伝え加熱を開始し、一時間後、それぞれの熱電対の起電力を測定した。これを繰り返し、いずれかの測定点における温度が著しく上昇した瞬間にカートリッジヒーターの加熱を停止し、その直前の熱流束を CHF とした。

(2)-2 CHFの定義

実際の実験中の銅ブロックの状態と、実験の経過時間と銅ブロックに挿入された 3 本の熱電対 (T.C. 1~3) の測定温度の関係を図 9、図 10 にそれぞれ示す。カートリッジヒーターの電力を上げ、銅ブロックに挿入されている熱電対の温度変化が $\pm 0.25$  [K] になった時点で定常状態とし、記録した。徐々に電力を上げていき、ある地点で急激に熱電対の温度が急上昇し、T.C. 1 の温度が  $300$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] を超えた時に加熱を中止した。その直前の準定常状態を保てた熱流束を CHF とした。

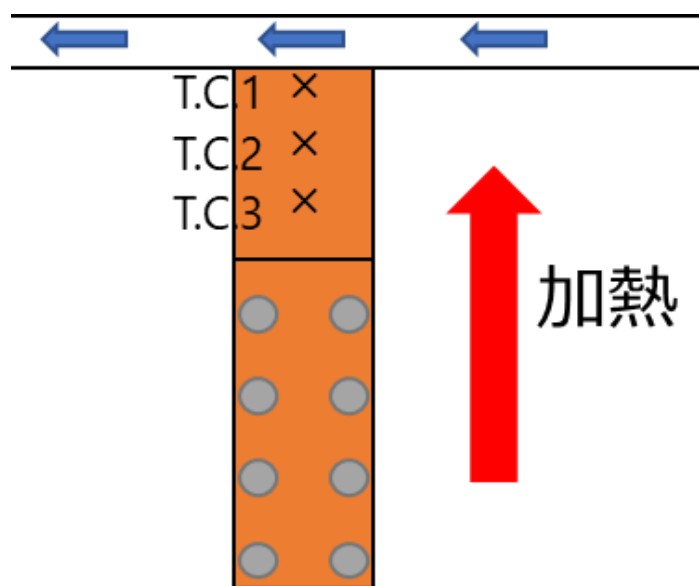


図9 銅ブロック

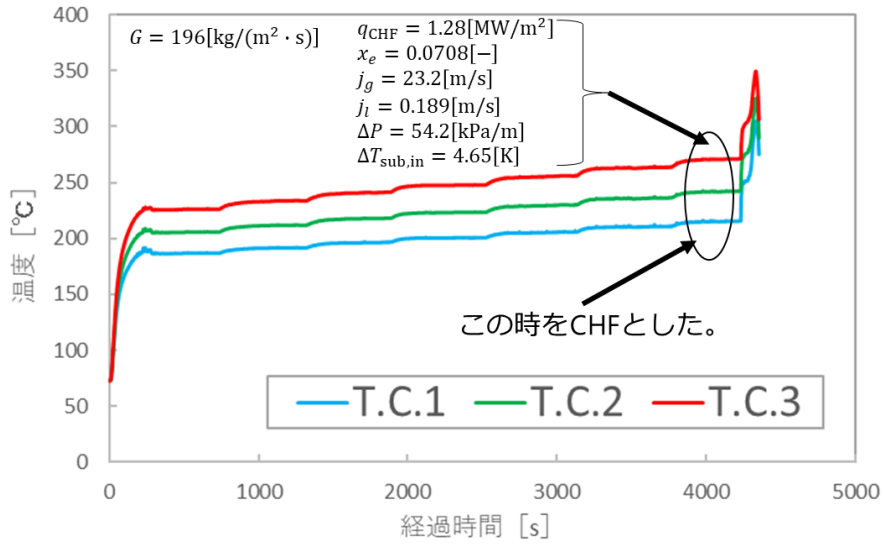


図10 CHF発生時の壁温変化とCHFの定義

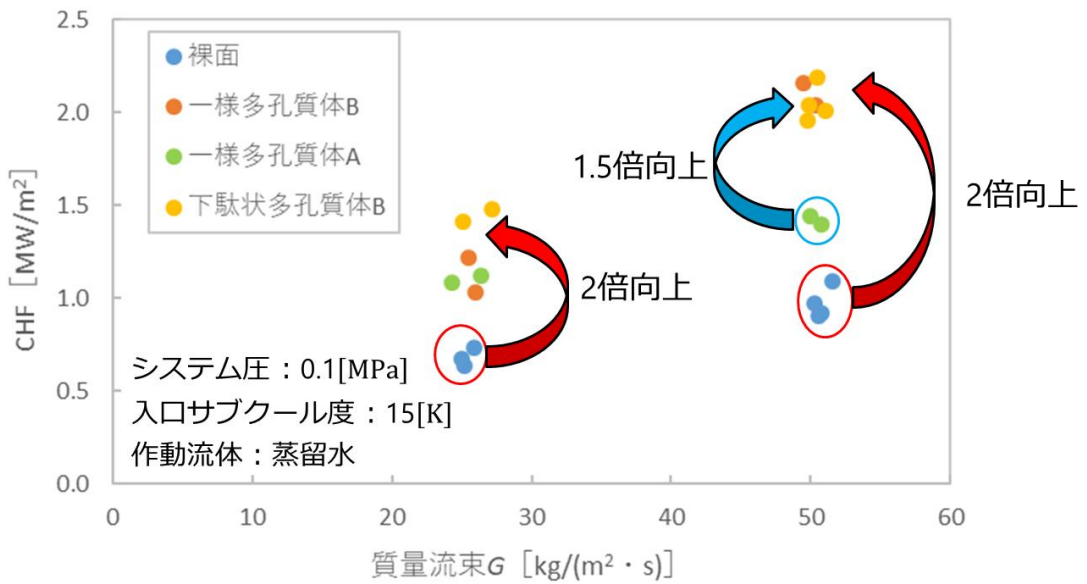


図11 質量流束とCHFの関係

### (2)-3 質量流束とCHFの関係

質量流束とCHFの関係を図11に示す。

#### (2)-3-1 裸面と三種類の多孔質体の比較

裸面と三種類の多孔質体の CHF を比較すると、三種類の多孔質体を装着した方が高い値となり、一様多孔質体 B に関しては、裸面に対して 2 倍近い CHF の向上が確認できた。この結果より、多孔質体を伝熱面に装着することにより、CHF が向上することが分かった。

#### (2)-3-2 一様多孔質体 B と一様多孔質体 A の比較

一様多孔質体 B と一様多孔質体 A の CHF を比較すると、高質量流束では、一様多孔質体 B の方が高い値となった。この結果より、吸水力がより大きい多孔質体を伝熱面に装着する方が、CHF は向上しやすくなることが分かった。

#### (2)-3-3 一様多孔質体 B と下駄状多孔質体 B の比較

一様多孔質体 B と下駄状多孔質体 B の CHF を比較すると、低質量流束では、下駄状多孔質体 B の方が高い値となった。この結果より、流路に流れる水と接する面積がより大きい多孔質体を伝熱面に装着する方が、CHF は向上しやすくなることが分かった。

### (2)-4 沸騰曲線

沸騰曲線を図12に示す。このグラフより、同じ過熱度条件下における、それぞれの熱流束の値を比較すると、多孔質体を伝熱面に装着することによって、裸面よりも高い熱流束を除去できることが分かった。この図より、同じ熱流束条件下における、それぞれの熱伝達率の値を比較すると、多孔質体を伝熱面に装着することによって、熱伝達率が向上することが分かった。

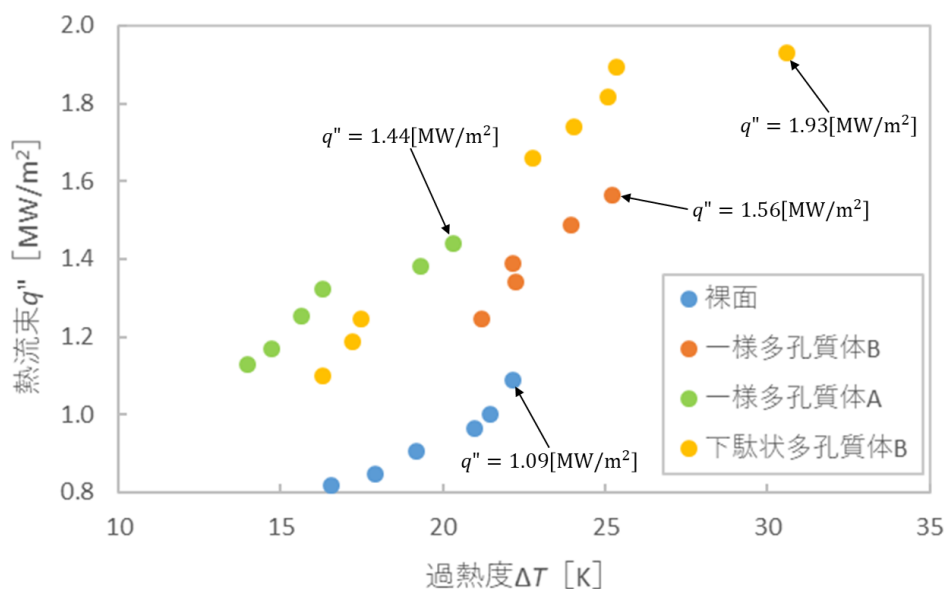


図12 沸騰曲線



### (3) まとめ

電解析出法により一様または下駄状金属多孔質層作成し、水平矩形狭隘流路での強制流動沸騰実験を行い、以下の知見が得られた。

- ・電解析出法により伝熱面上に一様および非一様な金属多孔質層を製作することが可能となった。
- ・一様または下駄状多孔質体により、CHF が裸面の約 2 倍向上した。
- ・同熱流束条件下で比較すれば、下駄状多孔質体の方が一様な多孔質体より熱伝達率は高くなった。

### 4 本研究が実社会にどう活かされるかー展望

地球温暖化、エネルギー問題からガソリン車から電気自動車、燃料電池車への転換は必須である。その中で次世代型車載用インバーターでは、パワーデバイスの高集積化が進み、その大きな発熱処理がボトルネックで薄型流路かつ大伝熱面積で、超高熱流束除熱可能な冷却手法が切望されているので本技術が活用できる可能性がある。

### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

これまで、プール沸騰の限界熱流束を向上させることに成功してきたが、その技術が強制流動沸騰にも応用できると考えて実施した研究内容である。

### 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

1. 森昌司, 中田 大貴, 冷却器及びそれを用いた冷却装置, 並びに, 発熱体の冷却方法, 特願2018-107456
2. 中田 大貴, 森 昌司, 下駄状多孔質体が狭隘矩形流路の流動沸騰限界熱流束に与える影響, 第 23 回 動力・エネルギー技術シンポジウム, 2018 年 6 月, 山口
3. 森 昌司 (九大)、中田大貴, 金属多孔質層が矩形狭隘流路の流動沸騰限界熱流束に与える影響, 第 25 回 動力・エネルギー技術シンポジウム, 2020 年 7 月, 北海道

### 7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

研究成果報告書 (<http://therme.mech.kyushu-u.ac.jp/jpn/research.html>)

平成 30 年度

下駄状多孔体と気泡微細化沸騰による  
超薄型流路冷却技術の革新補助事業

成果報告書

令和 2 年 3 月

国立大学法人 九州大学

森 昌司



本事業は、オートレースの補助を受けて実施しました。

1 研究の概要	3
2 研究の目的と背景	3
3 研究成果	4
3.1 幾何形状・細孔構造が制御された新型下駄状多孔体の開発	4
3.1.1 多孔質体の製作装置	4
3.1.2 多孔質体の製作装置	4
3.1.3 多孔質体の作製条件	5
3.1.3.1 電流の大きさによる性状の違い	5
3.1.3.2 電気分解時間による性状の違い	6
3.1.3.3 低電流の有無による性状の違い	6
3.1.4 吸水力の測定結果	6
3.2 下駄状多孔体による狭隘流路の流動沸騰 CHF の向上	7
3.2.1 実験方法	7
3.2.2 CHF の定義	7
3.2.3 質量流束と CHF の関係	8
3.2.3.1 裸面と三種の多孔質体の比較	8
3.2.3.2 一様多孔質体 B と一様多孔質体 A の比較	9
3.2.3.3 一様多孔質体 B と下駄状多孔質体 B の比較	9
3.2.4 沸騰曲線	9
3.3 まとめ	9

(2)(1) 以外で当事業において作成したもの  
特になし

**8 事業内容についての問い合わせ先**

所属機関名： 国立大学法人九州大学大学院工学研究院機械工学部門（コクリツダイ  
ガクホウジンキュウシュウダイガクダイガクインコウガクケンキュウインキカイコウ  
ガクブモン）

住 所： 〒819-0395  
福岡市西区元岡744

担 当 者： 教授 森 昌司（モリ ショウジ）

担 当 部 署： 機械工学部門（キカイコウガクブモン）

E - m a i l : [morisho@mech.kyushu-u.ac.jp](mailto:morisho@mech.kyushu-u.ac.jp)

U R L : <http://therme.mech.kyushu-u.ac.jp/>